

透水混凝土力学性能与透水功能协同优化研究综述

任毅

成都理工大学, 中国·四川 成都 610059

摘要: 透水混凝土作为海绵城市建设的核心材料, 其力学性能与透水功能的协同优化是提升工程应用价值的关键。论文系统梳理透水混凝土的材料组成与作用机制, 从骨料级配优化、胶凝材料体系创新、外加剂应用等维度, 深入探讨力学性能与透水功能的相互作用规律, 分析当前协同优化的技术瓶颈及解决路径, 结合可持续发展理念展望未来研究方向, 旨在为透水混凝土的高性能化设计提供理论支撑与实践指导。

关键词: 透水混凝土; 力学性能; 透水功能; 协同优化; 海绵城市

Review on the Synergistic Optimization of Mechanical Properties and Permeability Function of Permeable Concrete

Yi Ren

Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, 610059, China

Abstract: As a core material in sponge city construction, the synergistic optimization of mechanical properties and permeability is key to enhancing the engineering application value of permeable concrete. This paper systematically reviews the material composition and mechanism of action of permeable concrete, delving into the interaction between mechanical properties and permeability from dimensions such as aggregate gradation optimization, innovation in cementitious systems, and admixture application. It analyzes the current technical bottlenecks and solutions for synergistic optimization, and looks ahead to future research directions in line with sustainable development concepts. The aim is to provide theoretical support and practical guidance for the high-performance design of permeable concrete.

Keywords: permeable concrete; mechanical properties; permeability function; synergistic optimization; sponge city

0 前言

随着城市化进程的加速, 传统不透水路面引发的城市内涝、热岛效应等生态问题日益凸显。透水混凝土通过特殊级配设计形成多孔结构, 兼具雨水渗透与荷载承受能力, 成为缓解城市生态压力的重要技术手段。然而, 透水混凝土的力学性能(如抗压强度、抗折强度)与透水功能(如孔隙率、透水系数)常存在此消彼长的矛盾: 提高力学性能需增加胶凝材料用量或减小孔隙率, 导致透水能力下降; 而强化透水功能则可能因骨料间胶结面积减少而削弱强度。如何平衡两者关系, 实现协同优化, 成为制约透水混凝土广泛应用的核心问题。论文综合国内外研究成果, 对透水混凝土力学性能与透水功能协同优化的关键技术展开系统综述。

1 透水混凝土的材料组成与性能作用机制

1.1 骨料的基础作用

骨料是透水混凝土的骨架结构, 其粒径、级配、物理性质直接影响孔隙结构与力学性能。粗骨料通常采用单一级配的碎石或卵石, 粒径范围多为 5~20mm。研究表明, 较小粒径骨料(如 5~10mm)可增加骨料间接触点, 提升胶结层厚度均匀性, 从而提高抗压强度, 但孔隙率会相应降低; 较大粒径骨料(如 10~20mm)虽能形成更大连通孔隙, 提

升透水系数, 但骨料间胶结面积减少, 导致强度下降。骨料的硬度与级配设计需在强度与透水功能间寻求平衡, 例如采用间断级配(剔除中间粒径骨料)可形成更均匀的孔隙分布, 同时通过优化粒径组合(如 5~10mm 与 10~20mm 骨料按 3:7 比例混合), 可在保证孔隙率 $\geq 20\%$ 的前提下, 使抗压强度提升 15%~20%。

1.2 胶凝材料的关键作用

胶凝材料是包裹骨料颗粒、形成胶结层的核心组分, 其用量与性能直接影响界面粘结强度与孔隙结构。普通硅酸盐水泥是最常用胶凝材料, 但单一水泥体系存在早期强度发展慢、收缩性大等问题。研究发现, 引入粉煤灰、硅灰、矿渣等矿物掺合料可显著改善胶凝体系性能: 粉煤灰的球形颗粒形态可优化浆体流动性, 减少用水量, 降低孔隙率; 硅灰的高活性 SiO_2 成分能与水泥水化产物反应, 生成更致密的凝胶体, 提升界面粘结强度。例如, 在水泥中掺加 10%~15% 硅灰, 可使胶结层的抗压强度提高 20%~25%, 同时因浆体流动性改善, 骨料间胶结更均匀, 透水系数仅下降 5%~8%。胶凝材料用量通常为 250~400 kg/m^3 , 用量过低会导致胶结层过薄、强度不足; 用量过高则会填充孔隙, 降低透水性能, 因此需通过正交试验优化胶凝材料组成与用量。

1.3 水灰比的调控作用

水灰比是影响胶凝材料水化程度与浆体流动性的关键参数。较低水灰比（如 0.25~0.30）可减少游离水蒸发形成的孔隙，提高胶结层密实度与强度，但浆体流动性差，难以均匀包裹骨料，可能导致局部胶结薄弱；较高水灰比（如 0.35~0.40）虽能改善施工和易性，但过量水分蒸发后会增加胶结层内部孔隙，降低强度，同时可能因浆体流淌堵塞骨料间连通孔隙，影响透水功能。研究表明，水灰比控制在 0.30~0.35 时，胶凝材料既能充分水化，又能保持良好的流动性，可使透水混凝土的抗压强度达 20~25MPa，透水系数维持在 5~10mm/s，实现性能平衡。

2 力学性能与透水功能协同优化的关键技术

2.1 骨料级配优化技术

骨料级配设计是协调力学性能与透水功能的基础手段。传统单一粒径骨料难以兼顾强度与透水需求，而混合级配或间断级配设计可通过调整骨料颗粒间的堆积状态，形成“高强度骨架+合理孔隙率”的复合结构。例如，采用 5~10mm 与 15~20mm 两种粒径骨料按 2:3 比例混合，可使骨料堆积密度提高 12%，孔隙率控制在 18%~22%，同时抗压强度较单一 15~20mm 骨料提升约 18%。此外，引入棱角状骨料（如玄武岩碎石）可增加骨料间机械咬合力，提升抗折强度，而圆形骨料（如卵石）则更有利于形成连通孔隙，需根据具体工程需求选择骨料类型与级配。

2.2 胶凝材料体系创新

2.2.1 聚合物改性技术

在胶凝材料中添加聚合物（如丙烯酸酯、环氧树脂、聚乙烯醇）可显著增强骨料界面粘结力，改善胶结层韧性。聚合物分子链可渗透到骨料表面微孔中，形成“聚合物-水泥”互穿网络结构，提高界面过渡区的抗裂性能。例如，掺加 3%~5% 丙烯酸酯乳液的透水混凝土，其抗压强度可提升 25%~30%，抗折强度提升 30%~35%，同时因聚合物膜层的柔性特性，胶结层不易开裂，可维持孔隙结构稳定性，透水系数下降幅度小于 10%。

2.2.2 纳米材料增强技术

纳米材料（如纳米 SiO₂、纳米 TiO₂、碳纳米管）的高比表面积与活性位点特性，可优化胶凝材料微观结构。纳米 SiO₂ 能促进水泥水化反应，填充胶凝体系孔隙，使胶结层密实度提高；碳纳米管则可作为“纳米增强筋”，改善胶结层的抗拉强度与韧性。研究显示，掺加 1% 纳米 SiO₂ 与 0.1% 碳纳米管的复合体系，可使透水混凝土的抗压强度提高 35%~40%，透水系数保持在 8~12mm/s，同时抗冻融循环次数从 200 次提升至 300 次以上，耐久性显著增强。

纳米材料的分散性是影响增强效果的关键，采用超声分散（频率 40kHz，时间 30min）与表面改性（如硅烷偶联剂包覆纳米 SiO₂）可改善其在胶凝浆体中的均匀分布，避免团聚现象导致的局部强度缺陷。研究显示，经表面改性的纳米 SiO₂ 分散度提升 40%，胶结层的微观孔隙率（< 50nm

孔隙占比）从 35% 降至 22%，进一步优化力学性能。

2.3 外加剂协同应用策略

2.3.1 减水剂与增强剂配合

减水剂可减少胶凝材料用水量，降低水灰比，提高胶结层强度；增强剂（如硅烷偶联剂）可改善骨料与胶凝材料的界面粘结。例如，采用聚羧酸减水剂（掺量 0.5%~1.0%）与硅烷偶联剂（掺量 0.3%~0.5%）复配，可使胶凝浆体的流动度提升 30%，水灰比从 0.35 降至 0.30，同时界面粘结强度提高 20%，使透水混凝土的抗压强度达 25~30MPa，透水系数维持在 5~8mm/s。

2.3.2 引气剂与稳泡剂调控

引气剂可在胶凝浆体中引入微小气泡，改善和易性，同时避免因振捣过度导致孔隙堵塞；稳泡剂则可稳定气泡结构，防止消泡。在透水混凝土制备中，掺加 0.05%~0.1% 引气剂与 0.02% 稳泡剂，可使浆体含气量控制在 5%~8%，形成均匀分布的微小气泡，减少骨料间胶结层的收缩裂缝，同时对透水系数影响较小（下降幅度 < 5%），实现施工性能与长期性能的协同优化。

2.4 结构设计优化方法

2.4.1 多层复合结构设计

采用“基层+面层”双层结构可实现性能分工：基层采用较大粒径骨料（如 10~20mm）与高胶凝材料用量（350~400kg/m³），侧重力学性能，抗压强度需达 25 MPa 以上；面层采用较小粒径骨料（如 5~10mm）与适量胶凝材料（280~320kg/m³），优化透水功能与装饰效果，透水系数 ≥ 10mm/s。双层结构通过界面粘结剂连接，可使整体力学性能与透水功能提升 15%~20%，同时满足景观设计需求。

2.4.2 孔隙形态调控技术

通过模板成型、定向排列等方法调控孔隙分布与形态，可改善透水混凝土的力学性能与透水功能。例如，采用柱状模板形成垂直连通孔隙，可使透水系数提高 30%~50%，同时因孔隙定向分布，骨料间受力更均匀，抗压强度下降幅度 < 10%；采用三维打印技术定制孔隙结构，可根据荷载分布优化孔隙走向，实现“关键受力区域高强度、非受力区域高透水”的智能设计。

2.5 环境因素影响与适应性设计

环境因素对透水混凝土的力学性能与透水功能具有显著影响，需在协同优化中纳入气候、荷载、污染等多维度适应性设计。

在气候适应性方面，严寒地区的冻融循环会导致胶结层开裂、骨料剥落，需通过提高胶结层密实度（如降低水灰比至 0.28 以下）与引入抗冻外加剂（如引气剂与防冻剂复配）提升抗冻性能。研究表明，掺加 1.5% 硅灰与 0.08% 引气剂的透水混凝土，在 -20℃ 冻融循环 300 次后，强度损失率 < 12%，透水系数下降 < 15%。湿热地区的微生物繁殖与藻类生长可能堵塞孔隙，可通过表面喷涂光催化涂层（如 TiO₂）或选择具有抑菌特性的骨料（如火山岩）抑制生物附着，维持透水功能长期稳定。

荷载适应性设计需区分人行道、非机动车道与轻型车行道等不同使用场景。对于人行道（荷载 $\leq 20\text{kN}$ ），可采用孔隙率 25%~30% 的低强度设计（抗压强度 10~15MPa），优先保障透水功能；对于轻型车行道（荷载 $\leq 100\text{kN}$ ），需将孔隙率控制在 15%~20%，通过双层结构设计（基层抗压强度 $\geq 30\text{MPa}$ ，面层 $\geq 20\text{MPa}$ ）满足力学需求，同时通过优化孔隙连通性（如增加垂直贯通孔隙比例）维持透水系数 $\geq 5\text{mm/s}$ 。

污染适应性方面，工业区域的重金属污染雨水可能渗透至地下，需在透水混凝土中引入吸附材料（如负载活性炭的骨料或掺加膨润土的胶凝材料），实现污染物截留与净化。例如，掺加 10% 膨润土的透水混凝土对铅离子的吸附率可达 75% 以上，同时通过调整膨润土颗粒级配（ $\leq 0.075\text{mm}$ 占比 $\geq 60\%$ ），避免堵塞骨料间孔隙，确保透水功能不受显著影响。

3 协同优化的技术瓶颈与解决路径

3.1 技术瓶颈分析

①性能平衡机制不明确：力学性能与透水功能的量化关系尚未形成统一理论模型，设计依赖经验适配，缺乏精准指导。②长期性能稳定性不足：在荷载作用与环境侵蚀下，胶结层易开裂、孔隙易堵塞，导致性能衰减，现有优化技术对长期性能的提升效果有限。③成本控制难题：高性能改性材料（如纳米材料、特种聚合物）成本较高，制约大规模工程应用。④施工工艺复杂性：协同优化技术常需特殊施工设备或工艺（如三维打印、多层浇注），增加施工难度与管理成本。

3.2 解决路径探索

①多尺度理论建模：复合材料微观结构分析（如扫描电镜、X 射线衍射）与宏观性能测试，建立“骨料—胶结层—孔隙”多尺度模型，揭示力学性能与透水功能的内在关联，开发参数化设计软件，实现性能预测与优化。②自修复技术引入：将微胶囊自修复技术（如含环氧树脂的微胶囊）或微生物自修复技术（如产碳酸钙细菌）引入透水混凝土，当胶结层开裂时，修复剂自动释放填充裂缝，维持孔隙结构完整性，提升长期性能稳定性。③工业废渣高值化利用：加大钢渣、矿渣、粉煤灰等工业废渣在透水混凝土中的掺量（目标掺量 $\geq 50\%$ ），通过表面改性技术（如机械研磨、化学活化）提升废渣活性，降低水泥用量与成本，同时利用废渣的粗糙表面增强界面粘结，实现“降本—增效—环保”多重目标。④智能化施工工艺开发：结合建筑信息模型（BIM）与智能装备（如自动化搅拌系统、激光摊铺设备），实现骨料级配、胶凝材料用量、孔隙结构的精准控制，降低人为操作误差，提升施工效率与质量稳定性。

4 可持续发展视角下的未来研究方向

4.1 绿色材料体系构建

以低碳、循环为导向，进一步拓展工业废渣、再生骨

料在透水混凝土中的应用。例如，将建筑垃圾再生骨料经强化处理后（如水泥裹覆、聚合物浸渍）用于透水混凝土，替代天然骨料比例可达 70% 以上，同时通过优化胶凝材料体系（如高掺量粉煤灰—矿渣复合胶凝材料），使单位体积混凝土碳排放量降低 40%~50%，符合“双碳”目标要求。

再生骨料的强化处理可采用“水泥裹砂法”，即先将再生骨料表面裹覆一层水泥浆（水灰比 0.4~0.5），形成高强度外壳，再与新骨料混合使用。该工艺可使再生骨料的压碎指标从 30% 降至 15%，吸水率从 10% 降至 5%，有效提升透水混凝土的力学性能与耐久性。

4.2 功能复合化设计

赋予透水混凝土更多生态与社会功能，如结合光伏技术开发“透水—发电”一体化路面，或通过负载光催化材料实现空气净化功能。功能复合化设计需在力学性能与透水功能基础上，平衡新增功能对结构的影响，如光伏组件的铺设需确保透水路径不受阻，光催化材料的负载需避免堵塞孔隙，实现多目标协同优化。

4.3 智慧化监测与维护

引入传感器技术（如压力传感器、湿度传感器）与物联网系统，实时监测透水混凝土的力学性能（如应力分布、变形量）与透水功能（如透水率、孔隙堵塞程度）。通过大数据分析预测性能衰减趋势，及时触发维护机制（如自动清洗、局部修复），实现从“被动维护”到“主动管理”的转变，延长使用寿命并降低维护成本。

5 结语

透水混凝土力学性能与透水功能的协同优化，是其从实验室走向工程应用的关键突破点。通过骨料级配优化、胶凝材料创新、外加剂协同等技术手段，可在一定程度上缓解两者的矛盾，但长期性能稳定性、成本控制等问题仍需深入研究。未来，需以可持续发展为导向，融合绿色材料、智能技术与功能复合设计，构建“高性能—低能耗—多功能”的透水混凝土体系，为海绵城市建设提供更具竞争力的解决方案。随着多学科技术的交叉融合与工程实践的积累，透水混凝土有望在城市生态修复、资源循环利用等领域发挥更重要作用，推动人居环境向绿色、低碳、智慧方向转型。

参考文献：

- [1] 宋少民,许仲梓.新型混凝土技术[M].北京:科学出版社,2017.
- [2] 王稷良,孙振平.透水混凝土——理论与工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [3] 阎培渝,周比德.高性能混凝土[M].北京:清华大学出版社,2019.
- [4] 陈益民,许仲梓.胶凝材料学[M].北京:化学工业出版社,2020.
- [5] 李秋实,刘曙光.海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建[M].北京:中国建筑工业出版社,2021.

作者简介：任毅（2000-），男，中国四川成都人，从事透水混凝土力学性能与透水功能协同优化研究综述研究。